

**ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN DE CLORUROS EN  
LA ZONA NORESTE DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA**



**NATALIA PAOLA ROMERO SAMPER**

**ISSA MARIA FUENTES GUTIERREZ**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA–ATLÁNTICO**

**2019**

**ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN DE CLORUROS EN  
LA ZONA NORESTE DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA**

**NATALIA PAOLA ROMERO SAMPER**

**ISSA MARIA FUENTES GUTIERREZ**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO DE GRADO  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**Director**

**HEIDIS PATRICIA CANO CUADRO PhD**

**Codirector**

**MALKA IRINA MORA CÁRDENAS PhD**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA–ATLÁNTICO**

**2019**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Presidente de Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Dedicatoria**

Este proyecto de grado se lo dedicamos principalmente a Dios. A nuestros padres, que sin duda nos han apoyado y brindado todo el amor en cada paso de nuestras vidas, y finalmente a nuestras familias, ya que su motivación y comprensión han sido cruciales en este trabajo.

**Agradecimientos**

Gracias Dios por permitirme desarrollar un proyecto investigativo, ya que sin duda ha sido una experiencia muy enriquecedora tanto en el ámbito profesional como en el personal.

Agradezco enormemente a nuestras tutoras Heidis Cano y Malka Mora, gracias por su dedicación y paciencia en todo este proceso. A los auxiliares de laboratorios, principalmente el de CITA por su disposición y amabilidad. Igualmente, a la Universidad de la Costa por las instalaciones y equipos prestados. A mis amigos por el apoyo durante todo el proyecto. Y por último y no menos importante, gracias a mi familia, principalmente a mi madre por siempre creer en mí.

***Issa María Fuentes Gutiérrez y Natalia Paola Romero Samper***

### Resumen

La corrosión atmosférica es un fenómeno natural e irreversible que afecta las propiedades físicas y mecánicas de todos los materiales metálicos, lo cual conlleva a muchas pérdidas económicas y en el peor de los casos pérdidas humanas. Los iones de cloruro aceleran el proceso de corrosión y se encuentran en grandes cantidades en atmósferas marinas. Barranquilla por su cercanía al mar, presenta en el ambiente un alto contenido de cloruros como lo evidencia el grado de corrosión de algunas estructuras que se encuentran en la ciudad, lo que ocasiona una disminución en su vida útil. En este trabajo se expusieron 3 estaciones en diferentes edificios de la Universidad de la Costa, y por medio del método de la candela húmeda descrita en la norma ISO 9225, se determinó la concentración de cloruros. Se presentaron los resultados obtenidos durante 6 meses además de la evaluación de algunas variables atmosféricas que inciden en el proceso de corrosión. Los resultados muestran que la estación más cercana al mar fue la que presentó un mayor contenido de cloruros, con una concentración de 180,92 mg/m<sup>2</sup> día. Este resultado categoriza la zona según la norma ISO 9223 como una atmósfera S<sub>2</sub>, e indica un grado alto de deterioro según el índice de Brooks.

**Palabras clave:** corrosión, cloruros, candela húmeda, ISO 9223-2012

### Abstract

Atmospheric corrosion is a natural and irreversible phenomenon that affects the physical and mechanical properties of all metallic materials, which leads to many economic losses and, in the worst case, human losses. Chloride ions accelerate the corrosion process and are found in large quantities in marine atmospheres. Barranquilla due to its proximity to the sea, has a high content of chlorides in the environment, as evidenced by the degree of corrosion of some structures found in the city, which causes a decrease in its useful life. In this research three stations were exposed in different buildings of the University of the Coast, and by means of the wet candle method described in ISO 9225, the concentration of chlorides was determined. The results obtained during 6 months plus some atmospheric variables that affect the corrosion process were presented. The results show that the station closest to the sea was the one with the highest chloride content, with a concentration of 180.92 mg / m<sup>2</sup> per day. This result classifies the area according to ISO 9223 as an S2 atmosphere, and indicates a high degree of deterioration according to Brooks.

**Keywords:** corrosion, chlorides, wet candle, ISO 9223-2012

**Contenido**

Lista de tablas y figuras.....	9
1. Introducción.....	12
2. Planteamiento del problema .....	14
3. Justificación.....	17
4. Objetivos .....	18
4.1. Objetivo general.....	18
4.2. Objetivos específicos .....	18
5. Marco referencial .....	18
5.1. Marco teórico.....	18
5.1.1. Corrosión.....	18
5.1.2. Clasificación de los procesos de corrosión .....	19
5.1.3. Corrosión atmosférica .....	21
5.1.3.1. Condiciones atmosféricas.....	22
5.1.3.2. Tiempo de humectación (TDH).....	24
5.1.3.3. Contaminación atmosférica.....	25
5.1.3.4. Método de la candela húmeda.....	28
5.1.4. Método de análisis químico de la cantidad de cloruros depositados.....	29
5.1.4.1. Método argentométrico: titulación con nitrato de plata ( $\text{NaNO}_3$ ).....	29
6. Parte Experimental.....	34
6.1. Delimitación de las zonas de estudio .....	34
6.2. Información meteorológica .....	36
6.3. Determinación de cloruros .....	37
6.3.1. Candela húmeda.....	37
6.3.2. Determinación de $\text{Cl}^-$ .....	38
6.3.3. Proceso para titulación .....	40
7. Resultados y discusión .....	43
7.1. Influencia de las variables meteorológicas en la corrosión.....	43
7.2. Velocidad de deposición de cloruros en las zonas de estudio .....	49
8. Conclusiones.....	52
9. Recomendaciones .....	54
10. Referencias .....	58



### Lista de tablas y figuras

#### Tablas.

<b>Tabla 1.</b> Efecto del clima en la corrosión atmosférica. ....	23
<b>Tabla 2.</b> Clasificación del tiempo de humectación de superficies metálicas.....	24
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de la contaminación en el aire por salinidad representada por cloruro ....	28
<b>Tabla 4.</b> Índice de deterioro según Brooks.....	42
<b>Tabla 5.</b> Distribución de la dirección del viento en porcentaje en los 6 meses de exposición. ....	47
<b>Tabla 6.</b> Concentraciones de cloruro por muestra (mg/L).....	49
<b>Tabla 7.</b> Velocidad de deposición de cloruros en los meses de exposición para cada estación ...	50
<b>Tabla 8.</b> Componentes de un sistema de pintado. ....	55

#### Figuras.

<b>Figura 1.</b> Corrosión en puente peatonal ubicado en la carrera 46 con calle 90 de la ciudad de Barranquilla .....	15
<b>Figura 2.</b> Desmonte de puente peatonal por avanzado estado de corrosión, ubicado en la carrera 46 con calle 90 de la ciudad de Barranquilla.....	15
<b>Figura 3.</b> Corrosión en base de baranda pasa mano en zona de acceso al bloque 10 de la Universidad de la Costa.....	16
<b>Figura 4.</b> Celda electroquímica de corrosión sobre una varilla de refuerzo.....	20
<b>Figura 5.</b> Variación de la salinidad atmosférica con la distancia a la costa. ....	26
<b>Figura 6.</b> Captador de cloruro según la norma ISO 9225.....	29
<b>Figura 7.</b> Mapa de localización de la Universidad de la Costa en Barranquilla.....	34
<b>Figura 8.</b> Sitios de exposición de las estaciones en la Universidad de la Costa.....	35
<b>Figura 9.</b> Estación 1, Bloque 11.....	35
<b>Figura 10.</b> Estación 2, bloque 9 .....	36
<b>Figura 11.</b> Estación 3, bloque CUL. ....	36
<b>Figura 12.</b> Estación meteorológica de la Universidad de la Costa localizada en la azotea del bloque 9 .....	37

<b>Figura 13.</b> Candela húmeda expuesta para la determinación de la velocidad de deposición de cloruros.....	38
<b>Figura 14.</b> Proceso de filtración de las muestras antes de medir el pH.....	39
<b>Figura 15.</b> Medición de pH.....	39
<b>Figura 16.</b> Gráfica de la temperatura ambiente durante los meses de exposición.....	43
<b>Figura 17.</b> Gráfica de la humedad relativa durante los meses de exposición.....	44
<b>Figura 18.</b> Distribución mensual del tiempo de humectación. ....	45
<b>Figura 19.</b> Gráfica de la velocidad del viento durante los meses de exposición .....	47
<b>Figura 20.</b> Gráfica de la lluvia en unidades de mm/h durante los meses de exposición.....	48
<b>Figura 21.</b> Diagrama de barras de la velocidad de deposición de cloruros en los meses de exposición para cada estación.....	50
<b>Figura 22.</b> Variación de la salinidad con la distancia a la costa en las estaciones de estudio E1, E2 y E3 .....	51
<b>Figura 23.</b> Detalles de diseño que deben ser evitados y práctica recomendada .....	57

### Glosario de símbolos y términos

**Redox:** Es el nombre que recibe una reacción de tipo químico que implica la transferencia de electrones entre distintos compuestos, lo que lleva a una modificación del estado de oxidación.

En estas reacciones, un elemento pierde electrones y el otro los recibe.

**Oxidación:** Se denomina comúnmente oxidación a las reacciones químicas en las que el oxígeno se junta con otras sustancias, formando moléculas llamadas óxidos. Esto es particularmente frecuente en el mundo de los metales, aunque para nada exclusivo de ellos, y en términos químicos se entiende como la pérdida de electrones de un átomo, aumentando su carga positiva.

**Celda electroquímica:** La celda electroquímica es un dispositivo experimental para generar electricidad mediante una reacción redox espontánea en donde la sustancia oxidante está separada de la reductora de manera que los electrones deben atravesar un alambre de la sustancia reductora hacia la oxidante.

**Electrodo:** Es el extremo de un material conductor que, al estar vinculado con un medio, le transfiere u obtiene de él una corriente eléctrica (un flujo de cargas).

**Ánodo:** Es un electrodo con carga positiva.

**Cátodo:** Es un electrodo con carga negativa.

**Macroclima:** es una combinación de los fenómenos climáticos característicos de una región muy grande.

**Microclima:** es un clima local de características distintas a las de la zona en que se ubica. El microclima es un conjunto de patrones y procesos atmosféricos que caracterizan un entorno o ámbito reducido.

### **1. Introducción**

Una característica en común de las ciudades costeras es que son más propensas al fenómeno de la corrosión, por la acción de algunos agentes atmosféricos. Es normal observar en estas zonas, estructuras, equipos y/o piezas oxidadas o corroídas, lo cual conlleva a un mayor costo de mantenimiento para su conservación y prolongación de su vida útil.

Los estudios realizados por El-Sherik (2017) estimaron un costo de corrosión que oscila entre el 3% y el 4% del producto interno bruto (PIB) de cada país, el cual utiliza un 3,4% del PIB mundial del año 2013. El estudio muestra que el costo global de la corrosión puede estar alrededor de US\$ 2,5 billones. Por otro lado, Chaverra (2016) concluye que se puede lograr un ahorro global entre el 15 y el 35% del costo causado por los daños de corrosión, si el fenómeno se controla de manera preventiva y no correctiva sobre los daños en estado avanzado. Esto representa un ahorro entre US\$375 mil y US\$875 mil millones al año.

De allí surge la necesidad de buscar herramientas y metodologías alternativas para la prevención del fenómeno, en lugar de combatir sus daños; ya que en este último caso se deberá, de acuerdo al caso, realizar cambio de equipos, estructuras y piezas, en un tiempo menor al estimado de vida útil. Varias investigaciones como las de Moskvicheva, Sidyakinb & Shitovb (2016) y Hamadi, Mansouri, Oulmi, & Kareche (2018) buscan aportar estas herramientas de prevención por medio de diferentes métodos y uno de ellos es el uso de aminoácidos, con esto buscan una notoria disminución de los costos por corrosión. Así mismo, una herramienta esencial que permite prevenir los daños por corrosión de manera anticipada, consiste en la determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera, es decir, estimar el impacto generado por el ambiente agresivo sobre las estructuras como lo hacen los estudios de Delgado, Castaño, Correa, Restrepo, & Echeverría (2009). Los resultados que

aportan estos estudios permiten tener un mayor criterio en las decisiones ingenieriles, con el fin de prolongar la vida útil de las estructuras, piezas y equipos. Al conocer la agresividad del ambiente donde se va a realizar una construcción o a instalar equipos, se escogerán los materiales y se harán los diseños y procesos de construcción respectivos, siendo esto una acción que prevendrá y disminuirá los daños generados por la corrosión.

Uno de los componentes de las atmósferas corrosivas son los iones cloruro, que aceleran la corrosión al depositarse sobre la superficie de los materiales. Estos, al depositarse en la capa de humedad de la superficie del metal, aumenta la conductividad de la película del electrolito sobre el metal y desequilibran así, las películas pasivantes del material, que son las que se forman para su protección a agentes externos (S. Rivero, 2007, pág. 371).

En este estudio, se estimará la velocidad de deposición de cloruros en las instalaciones de la Universidad de la Costa mediante el método de la candela húmeda de acuerdo a la Norma establecida por la Organización Internacional de Estandarización (ISO 9225, 2012).

## 2. Planteamiento del problema

La corrosión es un proceso electroquímico que experimentan los materiales al estar en interacción con la atmósfera. Los factores ambientales y contaminantes tienen gran incidencia en el proceso de corrosión, como es el caso de la humedad relativa, que al superar el 78% de humedad incide en la aceleración de la corrosión; así mismo, la velocidad del viento, la temperatura y la precipitación (LeBozec, Jönsson, & Thierry, 2004).

En ambientes costeros se genera un notable aumento de la corrosión atmosférica en comparación con una atmósfera limpia, debido a la deposición de iones cloruro, que disueltos en la capa de humedad elevan considerablemente la conductividad de la película de electrolito en el metal y tienden a destruir cualquier película pasiva. Los cloruros afectan directamente la velocidad de corrosión, siendo uno de los contaminantes atmosféricos que más aceleran el proceso de corrosión debido a que forman productos de corrosión solubles.

Barranquilla, como bien sabemos es una ciudad costera, por tanto, presenta una notable sensibilidad a la corrosión atmosférica, lo que trae como consecuencia la pérdida de propiedades en distintos materiales, especialmente los materiales metálicos, dañando así de una forma más acelerada las estructuras. Muestra de esto es el deterioro de algunas estructuras en la ciudad presentado principalmente por efecto de la corrosión, destacando el caso anunciado recientemente por el periódico local El Heraldó (ver Figura 1 y 2), el cual muestra el desmonte de un puente peatonal de la ciudad debido al avanzado estado de corrosión en el que se encontraba. El estado de dicho puente generó desconfianza en los peatones en cuanto a la utilización de la obra pública, debido a que se verían expuestos a riesgos por alguna falla y por consiguiente el desplome del puente (Perez, 2018); Así mismo, estructuras dentro de la Universidad de la Costa se ven afectadas por este fenómeno, como se observa en la Figura 3.



*Figura 1. Corrosión en puente peatonal ubicado en la carrera 46 con calle 90 de la ciudad de Barranquilla.*

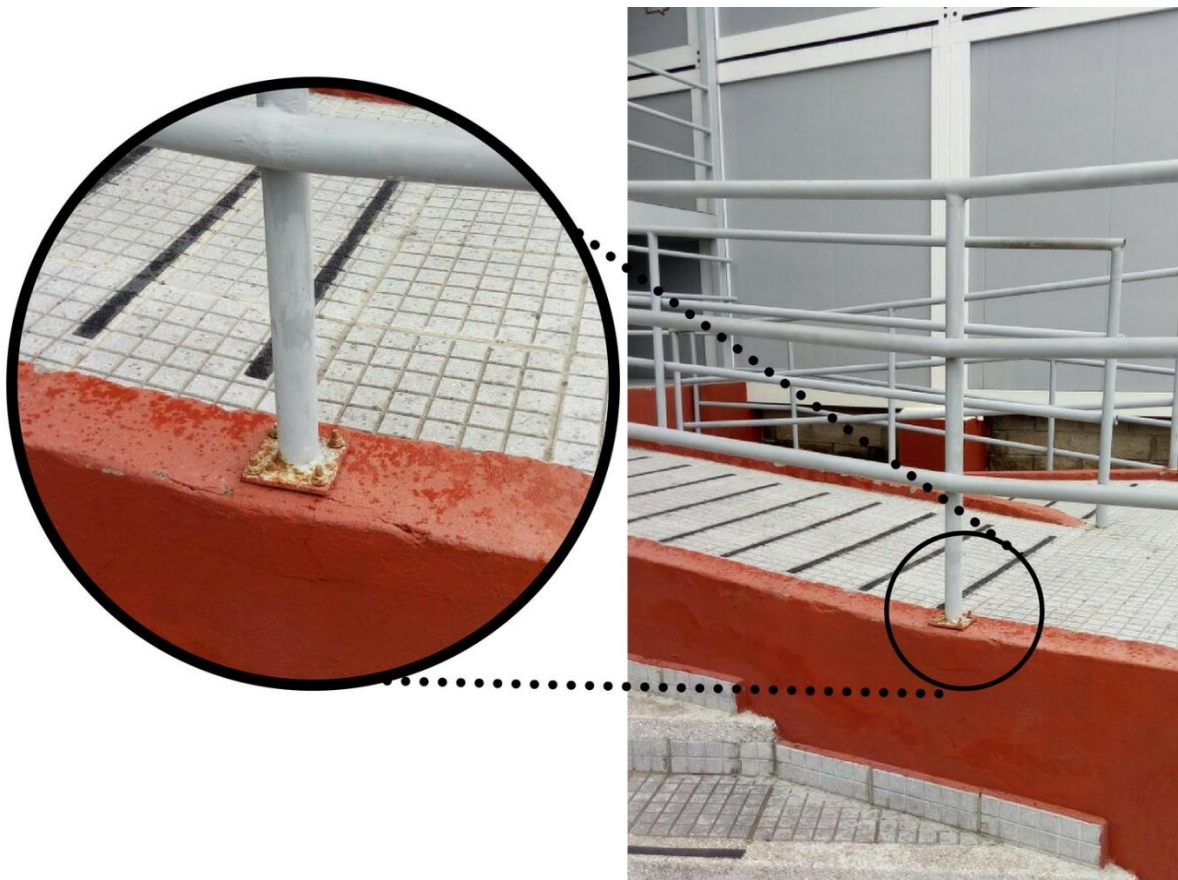
*(Fuente: Rafael Polo. Tomado de: <https://www.elheraldo.co/barranquilla/el-desmonte-del-puente-de-la-carrera-46-con-calle-90-505284>)*



*Figura 2. Desmonte de puente peatonal por avanzado estado de corrosión, ubicado en la carrera 46 con calle 90 de la ciudad de Barranquilla. (Fuente: Rafael Polo. Tomado de: <https://www.elheraldo.co/barranquilla/el-desmonte-del-puente-de-la-carrera-46-con-calle-90>)*

Si bien es cierto, que la Universidad de la Costa en los últimos años ha venido desarrollando una serie de inversiones con el fin de fortalecer su planta física, es imprescindible dentro de esa serie de inversiones estimar que tanta concentración de iones cloruros se encuentren en el ambiente y cómo influyen las variables meteorológicas en la corrosión de sus estructuras. Por todo lo anterior se plantea el siguiente interrogante:

¿Cuál es la concentración de iones cloruro en las instalaciones de la Universidad de la Costa ubicada en la ciudad de Barranquilla?



*Figura 3. Corrosión en base de baranda pasa mano en zona de acceso al bloque 10 de la Universidad de la Costa.*

*(Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)*



### **3. Justificación**

Barranquilla, capital del departamento del Atlántico, es una ciudad ubicada en las cercanías del mar caribe, y según las investigaciones de Castaño y col. (2010), es una ciudad con gran presencia de iones cloruro en el ambiente.

A pesar de que los cloruros son uno de los componentes atmosféricos que más acelera la corrosión de los materiales metálicos, hemos observado que la ciudad no sólo carece de un estudio reciente de corrosión atmosférica, sino que también es un fenómeno muy poco estudiado en Colombia y en toda Latinoamérica.

La corrosión anualmente representa pérdidas, no solo económicas, sino también humanas, ya que por el contenido de estos iones en este tipo de atmósfera, es muy común encontrar estructuras, equipos e instalaciones que pierden sus propiedades mecánicas y/o estructurales.

En medio de esta situación y con la ya mencionada carencia de estudios que relacionen los iones cloruro con la corrosión atmosférica en Barranquilla, surge la idea de medir la velocidad de deposición de iones cloruro en la zona noreste de la ciudad de Barranquilla y de acuerdo a eso clasificar el aire según el grado de contaminación que tiene por salinidad representado por los iones cloruros.

Este estudio proporcionará un mejor entendimiento del fenómeno de la corrosión atmosférica sobre las instalaciones de la Universidad de la Costa en Barranquilla, ya que una vez clasificada su atmósfera de acuerdo a la normativa internacional se pueden sugerir y establecer pautas para el mantenimiento más efectivo a las diferentes estructuras metálicas de esta.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo general**

Determinar la concentración de iones cloruros en la zona noreste de la ciudad de Barranquilla.

### **4.2. Objetivos específicos**

- Delimitar las zonas de estudio en espacios estratégicos de las instalaciones de la Universidad de la Costa.
- Implementar el método de la candela húmeda de acuerdo a la norma ISO 9225-2012 para establecer la velocidad de depósito de iones cloruro durante 6 meses.
- Medir variables meteorológicas durante el tiempo de exposición.
- Categorizar las zonas de estudio de acuerdo a la contaminación en el aire por salinidad representada por cloruro según la norma ISO 9223-2012.

## **5. Marco referencial**

### **5.1. Marco teórico**

#### **5.1.1. Corrosión**

De manera general, el término corrosión es entendido como el proceso de deterioro de un metal, en el que este reacciona a alguna sustancia del medio ambiente que lo rodea.

El manual básico de corrosión para ingenieros afirma que: “El término corrosión suele referirse normalmente al ataque de los metales, aunque otros materiales no metálicos, como los cerámicos y los polímeros, también pueden ser deteriorados por ataques químicos directos, pero en estos casos suele utilizarse el término degradación” (Gómez, 2004, pág. 13)

De acuerdo con el medio que rodea al material, se pueden dar dos tipos de corrosión: la corrosión directa y la corrosión electroquímica.

### **5.1.2. Clasificación de los procesos de corrosión**

#### **a) Oxidación directa**

La oxidación directa ocurre cuando “el metal reacciona directamente con el agente agresivo ( $O_2$ ,  $SO_2$ , etc.), afectando de manera similar a toda la superficie metálica” (Morcillo Linares & Chico González, 2018, pág. 33)

#### **b) Corrosión electroquímica**

Es una reacción química que ocurre cuando el metal está en contacto con electrolitos (estos pueden ser soluciones salinas, agua, bases, ácidos, entre otros). A diferencia de la oxidación directa, en este caso el ataque corrosivo sucede únicamente en zonas anódicas del metal y no afecta de manera uniforme toda la superficie (Sánchez 2002).

La corrosión electroquímica ocurre por la presencia de celdas electroquímicas que se forman entre partes del metal que no son idénticas entre sí. Esto genera la existencia de un proceso redox (reacción de reducción-oxidación) que contiene dos reacciones de electrodos: la reacción anódica de oxidación y la reacción catódica de reducción (Morcillo Linares & Chico González, 2018, pág. 34).

Este proceso de corrosión es el que se presenta en los materiales metálicos y además en los aceros de refuerzo estructural (embebidos en el concreto). La Figura 4 muestra la celda electroquímica a partir de la cual se da el proceso de corrosión y está compuesta por:

- Un ánodo donde se da la oxidación

- Un cátodo donde se da la reducción
- Un conductor metálico donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
- Un electrolito donde la corriente eléctrica es producida por el flujo de iones dentro de un medio acuoso. (Sánchez, 2002, pág. 184)

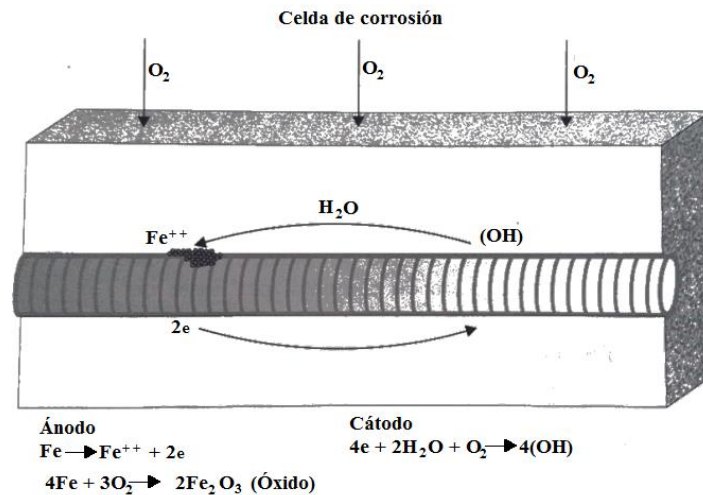
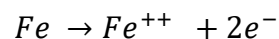


Figura 4. Celda electroquímica de corrosión sobre una varilla de refuerzo. Fuente: Tomado de: Sánchez, D. (2002).

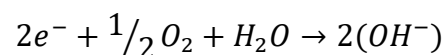
Durabilidad y patología del concreto. Asocreto. Pág. 184.

Siguiendo con el caso de ejemplo, acero de refuerzo en el concreto, las reacciones en el proceso de corrosión y sus partes son las siguientes:

En la zona anódica (donde ocurre la oxidación del elemento), la reacción que ocurre es:



En la zona catódica, los electrones en exceso que hay en el acero se combinan con el agua y el oxígeno para formar iones oxidrilo. La reacción que se da es:



Consecutivamente, los iones de hierro ( $\text{Fe}^{++}$ ) y oxidrilo ( $\text{OH}^-$ ) se combinan para formar óxido. En la práctica, los productos de oxidación están más o menos hidratados, lo que significa que el oxígeno solamente se consume para formar productos de oxidación y que el agua solo es necesaria para conseguir que el proceso electrolítico se produzca (Sánchez, 2002, págs. 184-185).

Existen varios tipos de corrosión electroquímica: corrosión uniforme, localizada, por picaduras, atmosférica, entre otras. Es de nuestro interés, principalmente la corrosión atmosférica, puesto que es en este tipo de corrosión donde factores como la deposición de cloruros tiene relevancia.

### **5.1.3. Corrosión atmosférica**

La corrosión atmosférica en un ambiente seco tiene un efecto de poco impacto en los materiales, pero sí tiene importancia en superficies humedecidas. El electrolito en este tipo de corrosión es una película de humedad o una película acuosa (Morcillo Linares & Chico González, 2018).

Una película de humedad puede considerarse como el depósito de agua sobre la superficie metálica, y existen varios factores responsables de producirlo, como es el caso de la precipitación atmosférica (en forma de lluvia o niebla espesa), y de la condensación de humedad producida cuando la humedad relativa de la atmósfera es superior al 100%. Lo que ocurre es que la temperatura del metal disminuye por debajo del punto de rocío formando así innumerables gotas pequeñas. También son factores responsables la condensación por adsorción, la condensación capilar y la condensación química (Morcillo Linares & Chico González, 2018, pág. 36).

La corrosión atmosférica está influenciada por un conjunto de factores como: condiciones atmosféricas (lluvia, humedad, temperatura, vientos), contaminantes atmosféricos, composición del metal, entre otros, que se explicarán a continuación.

#### **5.1.3.1. Condiciones atmosféricas**

Algunos de estos factores son: la temperatura ambiente, precipitación pluvial, viento, humedad relativa, entre otros. Estos factores influyen en la corrosión atmosférica porque son los que determinan el parámetro de tiempo de humectación (TDH), es decir, determinan el tiempo que permanecerá mojada o húmeda la superficie del material (Mariaca y col., 1999, pág. 26).

**a) Temperatura:** este factor afecta la humedad relativa, el punto rocío, el tiempo de humectación y la cinética de los procesos de corrosión. A altas temperaturas la cinética de las reacciones químicas de la corrosión se incrementa, por otro lado, la humedad depositada sobre la superficie metálica se evapora, descende la concentración de oxígeno y de otros gases corrosivos, e incluso pueden producirse cambios en las propiedades protectoras de las capas de los productos de corrosión (Navarrete Cueva y col, 2007, págs. 30,31).

**b) Lluvia:** Este factor influye de manera positiva en el fenómeno de la corrosión lavando o limpiando el ambiente y la superficie de los materiales de agentes contaminantes, pero puede ser contraproducente para elementos o estructuras que permitan la acumulación de agua en ellos, en imperfecciones como hendiduras, grietas o cuando su forma y diseño así lo permiten (Navarrete Cueva y col., 2007, pág. 28).

- c) **Viento:** La velocidad y dirección del viento tienen gran incidencia en la salinidad atmosférica, los cloruros son arrastrados por los vientos y se depositan en los materiales, pasado cierto tiempo y distancia recorrida (Morcillo M. C., 2018, pág. 88).
- d) **Humedad relativa:** Es la expresión porcentual de vapor de agua presente en el aire con respecto a la máxima posible, y es uno de los factores de mayor importancia en la corrosión atmosférica porque repercute en la frecuencia y duración de los periodos de lluvia, rocío y niebla, durante los cuales las superficies metálicas aparecen visiblemente mojadas, y en las que las micropilas de corrosión desarrollan plenamente su actividad (Morcillo Linares & Chico González, 2018, pág. 37).
- e) **Clima:** Es el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región y está definido en términos de la temperatura, la humedad, y la presión atmosférica (Sánchez, 2002, pág. 21).

La Tabla 1 presenta el efecto del clima en la corrosión atmosférica de los cuatro materiales tecnológicamente más útiles: acero, cinc, cobre y aluminio. Se puede observar el efecto de la humedad relativa en la corrosión especialmente del acero y del cinc (Mariaca y col., 1999, pág. 26).

**Tabla 1.**

*Efecto del clima en la corrosión atmosférica*

Promedio anual			Corrosión, mm/año			
T, °C	%HR	CLIMA	Fe	Zn	Cu	Al
16	37	Semiárido	15,0	0,19	0,19	Desp.
16	55	Verano seco	12,6	0,27	0,97	0,06
16	59	Invierno seco	12,3	0,14	0,28	0,02

<b>14</b>	69	Sin estación seca	14,1	0,28	0,89	0,07
<b>21</b>	56	Sabana tropical	15,2	1,16	0,23	Desp.
<b>25</b>	84	Selva tropical	15,7	0,98	0,56	0,01

*Nota: Valor despreciable = desp.*

*Tomado de Mariaca y col., 1999, pág. 26. Corrosividad atmosférica. México, D.F.: Plaza y Valdés*

### 5.1.3.2. Tiempo de humectación (TDH)

El tiempo de humectación es uno de los factores con mayor incidencia en la corrosión de los materiales, representa el tiempo en el cual la superficie de la placa metálica está suficientemente húmeda para que ocurra el proceso de corrosión, y se define también como la suma de los tiempos parciales de humectación durante el cual es posible la corrosión metálica (Morcillo Linares & Chico González, 2018, pág. 37).

Para obtener el tiempo de humectación calculado ( $\tau$ ) de una superficie que se corroe, se considera que la humedad relativa (HR) debe ser  $\geq 80\%$  y la temperatura  $\geq 0^\circ\text{C}$ . Cabe anotar las siguientes observaciones: el tiempo de humectación depende, por lo tanto, de la zona macro climática y de la localización y puede clasificarse de acuerdo con la ISO 9223 (ver Tabla 2). Los valores clasificados están basados en características de larga duración de zonas macro climáticas para condiciones típicas de las categorías o tipos de localización.

**Tabla 2.**

*Clasificación del tiempo de humectación de superficies metálicas*

TIEMPO DE HUMECTACIÓN	
NIVEL	HORAS/AÑO
$\tau 1$	$\tau \leq 10$



$\tau 2$	$10 < \tau \leq 250$
$\tau 3$	$250 < \tau \leq 2500$
$\tau 4$	$2500 < \tau \leq 5500$
$\tau 5$	$5500 < \tau$

*Nota: Tomado de ISO 9223:2012*

### 5.1.3.3. Contaminación atmosférica

Para que los efectos de corrosión sobre un material tengan un impacto considerable se hace necesario que la atmósfera con la que está interactuando esté contaminada. Es muy común que los principales agentes contaminantes en la atmósfera sean el cloruro de sodio (NaCl) y el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). La sal NaCl llega de la atmósfera desde el mar y, algunas veces, desde suelos salinos. El dióxido de azufre se encuentra en el aire contaminado por humos industriales y de hogares domésticos, y es producido por la quema de combustibles que contienen azufre.

A menudo, entre mayor es la contaminación atmosférica en SO<sub>2</sub> o NaCl así también será la velocidad de corrosión. Para fines de esta investigación, se tiene en cuenta únicamente el cloruro sódico como contaminante de la atmósfera. En zonas de alta contaminación salina, la corrosión se manifiesta como una función lineal del tiempo, prueba de que la herrumbre formada bajo estas circunstancias no es protectora. El grado de contaminación salina depende de la distancia del mar (ver Figura 5), así como de la velocidad de corrosión marina, de la dirección y velocidad del viento (Morcillo Linares & Chico González, 2018, págs. 40, 47).

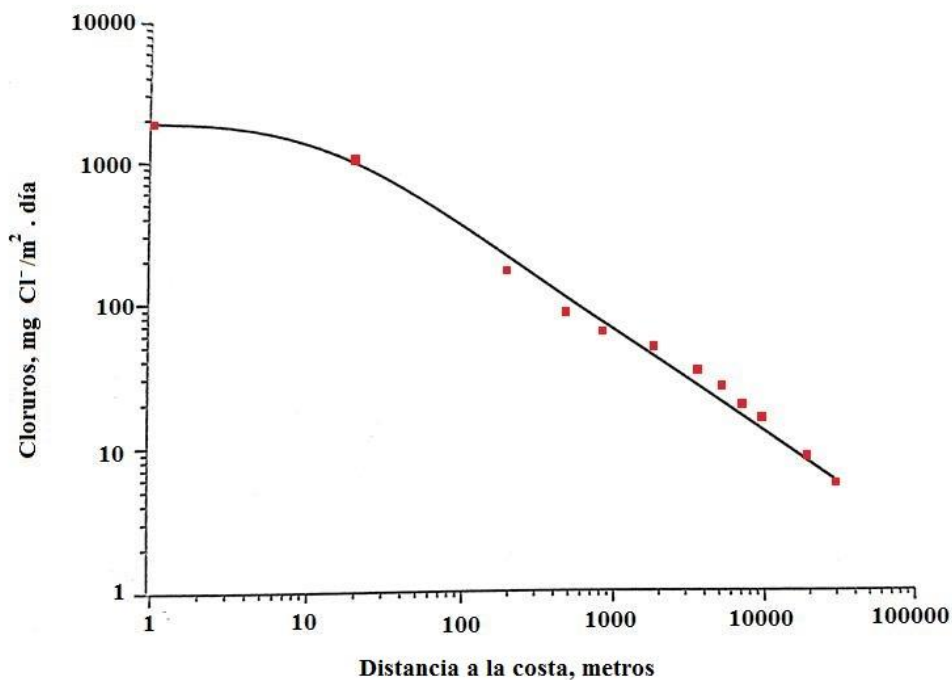


Figura 5. Variación de la salinidad atmosférica con la distancia a la costa. Datos obtenidos en 29 zonas de Europa.

Nota: Fuente: tomado de (La corrosión atmosférica del acero al carbono en ambientes costeros, 2018, pág. 47)

### Herrumbre

Es el producto de corrosión que consiste en la formación de hidróxidos, óxidos y películas salinas sobre la superficie de los metales, y se generan cuando el proceso de corrosión se ha prolongado y tiene la capacidad de disminuir, a menudo, la velocidad de corrosión. Es decir, que en un periodo largo de tiempo, son los mismos productos de corrosión los que influyen en la dimensión de las pérdidas de corrosión (Morcillo Linares & Chico González, 2018, págs. 111, 112).

### Clasificación de la agresividad del medio ambiente

Para ambientes tropicales como el de Colombia y según lo señala Sánchez (2002), se da la siguiente clasificación:

**Ambiente ligero o débil.** Hace referencia a ambientes secos como el interior de edificaciones de vivienda, oficinas, o comercio (dormitorios, salas, oficinas, almacenes, etc.); y, ambientes exteriores rurales donde la humedad relativa es inferior al 60%. Es decir, ambientes en donde el material no estará expuesto a ciclos de humedad y secado, a congelación y deshielo, o a la presencia de sustancias potencialmente agresivas para el concreto.

**Ambiente moderado.** Se refiere al interior de edificaciones con ambientes húmedos y cambiantes (humedad relativa entre 60% y 98%), o con riesgo temporal de vapores de agua (baños, cocinas, garajes, lavanderías, etc.) y condensación del agua; materiales expuestas a ciclos de humedad y secado, materiales en contacto con agua dulce en movimiento; ambientes rurales lluviosos; ambientes urbanos sin alta condensación de gases agresivos; y materiales en contacto con suelos ordinarios.

**Ambiente severo.** Contempla ambientes húmedos con hielo, de agua dulce y agentes de deshielo, ambientes marinos o con macroclima industrial y humedad relativa entre el 60% y el 98%, ambientes urbanos con alta condensación de gases agresivos, y materiales en contacto con suelos también agresivos.

**Ambiente muy severo.** Incluye zonas de salpicaduras o sumergidas en agua de mar con una cara expuesta al aire, elementos en aire saturados de sal, ambientes

con agua de mar y hielo, exposición directa a líquidos con pequeñas cantidades de ácidos, ambientes salinos o aguas fuertemente oxigenadas, gases agresivos y ambientes industriales muy agresivos (Sánchez, 2002, págs. 30,32).

Por su parte, la ISO 9223 hace una clasificación de acuerdo a la contaminación por la salinidad en el aire, representada por cloruro, como se observa en la siguiente tabla 3:

**Tabla 3.**

*Clasificación de la contaminación en el aire por salinidad representada por cloruro*

<b>TASA DE DEPOSICIÓN DE CLORUROS mg/(m<sup>2</sup>.d)</b>	<b>CATEGORÍA</b>
$S_d \leq 3$	$S_0$
$3 < S_d \leq 60$	$S_1$
$60 < S_d \leq 300$	$S_2$
$300 < S_d \leq 1500$	$S_3$

*Nota: Tomado de ISO 9223*

#### **5.1.3.4. Método de la candela húmeda**

El método de la candela húmeda tiene como principio exponer durante un tiempo específico una superficie textil húmeda protegida contra la lluvia, como se observa en la Figura 6. La cantidad de iones cloruro depositados se determina por análisis químico. A partir de los resultados de este análisis, se calcula la tasa de deposición de iones cloruro, expresada en miligramos por metro cuadrado por día [mg/(m<sup>2</sup>d)] (ISO 9225, 2012).



Figura 6. Captador de cloruro según la norma ISO 9225. (Fuente: elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

#### **5.1.4. Método de análisis químico de la cantidad de cloruros depositados**

##### **5.1.4.1. Método argentométrico: titulación con nitrato de plata ( $\text{NaNO}_3$ )**

Se trata de un método directo para valorar haluros (cloruros y bromuros) mediante la adición de una solución estándar de  $\text{AgNO}_3$  0,1 N y como indicador se emplea una solución soluble de cromatos, el  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  (cromato de potasio) que imparte coloración amarilla a la solución problema.

Lo que se busca es que reaccionen en primer lugar los cloruros dando un precipitado blanco de  $\text{AgCl}$  (cloruro de plata) y que al consumirse éstos, el primer exceso de ion plata reaccione con el indicador dando un precipitado de  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  (cromato de plata) rojo, indicativo del final de la titulación (American Public Health Association, 1999).

#### **Estado del arte**

Muchos estudios se han encargado de identificar cual es el papel de los iones cloruros en la corrosión atmosférica.

En un contexto internacional, Chico, y col. (1998) muestran en su trabajo, como la salinidad atmosférica es el factor predominante en este tipo de corrosión cuando se está en una atmósfera marina pura. Los autores establecen que la salinidad y la corrosión están relacionados linealmente. Adicional a esto, muestran la relación hiperbólica que existe entre la salinidad, corrosión y la distancia a la cual se encuentra el mar.

En ese mismo año, Morcillo y col. tratan de predecir a corto y largo plazo la corrosión atmosférica de metales, y para esto relacionan los parámetros meteorológicos con este fenómeno. Este estudio explica que siempre va a existir corrosión atmosférica, debido a que la superficie del material metálico siempre va a estar ligeramente mojado; La situación que se produce gracias a los parámetros meteorológicos, tales como la humedad relativa, la lluvia o la niebla, y que la aceleración del fenómeno se da por medio de los contaminantes atmosféricos tales como los cloruros o los sulfatos (Morcillo M. , 1998).

LeBozec, Jonsson & Thierry (2004) revelan una fuerte relación entre la humedad relativa, la temperatura y los cloruros. Dicha investigación describe que los parámetros ya mencionados tienen una directa proporcionalidad con la velocidad de corrosión en algunas aleaciones del magnesio. Estos estudios no solo muestran que a medida que se aumentaba alguna de estas tres variables ambientales se aumentaba la velocidad de corrosión, sino que también la corrosión se aceleraba si la superficie del material era porosa.

Cole, Ganther, Furman, Muster, y Neufeld, (2010) realizan un estudio a 5 países sobre las tasas de corrosión atmosférica del zinc y acero en regiones tropicales de Australia, Tailandia, Indonesia, Vietnam y Filipinas. Para este estudio se toman muestras de estaciones con diferentes tipos de atmósfera dentro de las cuales se encuentran las atmósferas marinas, industriales, marinas severas, industriales severas, marinas-industriales y urbanas. La

estación de Cowley Beach en Australia, no solo fue la estación con más velocidad de deposición de cloruros con 400 mg/m<sup>2</sup> día, sino que también fue la estación con mayor pérdida de masa, para el zinc presentó 7,6 µm/año y para el acero 285,5 µm/año. Cabe resaltar que fue la única estación analizada con una atmósfera marina severa.

En el Caribe, Corvo y col. (1997) estudian la corrosividad atmosférica de países como México, Cuba y Venezuela. Las estaciones de análisis fueron colocadas en ciudades o pueblos con no más de 30 km de distancia al mar. En algunas estaciones fue muy común encontrar valores de corrosión superiores a los establecidos en el estándar ISO 9223. En Cuba, por ejemplo, la estación de Viriato, localizada a solamente 0,01 km del mar superó la clasificación C5. Las estaciones que también superaron la clasificación en Venezuela fueron La Voz y Adicora a una distancia de 0,15 km y 0,05 km, respectivamente. Y por último tenemos la estación de Puerto Progreso en México que también superó el estándar a tan solo 0,05 km del mar.

Los estudios sobre corrosión en Colombia han sido pocos, en comparación con Europa, esto se debe a que la preocupación en Colombia por este fenómeno es muy reciente y se desconoce bastante de los problemas que trae y la forma cómo prevenirlo. El desconocimiento de la corrosión es un problema que se repite en casi toda América Latina. Por el contrario, en países desarrollados, la cantidad de estudios tiene un número significativo, debido a que en los últimos años, este fenómeno ha ocasionado pérdidas correspondientes al 5% de PIB en algunos países, cifra que sin duda alertan e incentivan a las investigaciones para prevenir los efectos de la corrosión (Cuervo, Delgado, Herrera, & Arroyave, 1998).

Restrepo y col. (2007) realizaron un trabajo en donde integran los estudios de corrosión con los sistemas de información geográficos. Aquí primero se toman datos puntuales de las diferentes estaciones ubicadas estratégicamente en Colombia, en donde se miden velocidades de corrosión para pequeñas placas de acero. A partir de estos datos se realiza un mapa en donde se categoriza la corrosividad según las velocidades de corrosión medidas para las 21 estaciones de ensayo del país. Para esto se utiliza la norma ISO 9223 y se construye un mapa con el software ArcGis 9.0. El resultado de la investigación fue un mapa en donde pueden establecerse tendencias del comportamiento espacial. Una de las tendencias más marcadas, se encuentra en la Costa Atlántica, donde se presenta categorías tipo C4 y C5. Barranquilla, que es nuestro objeto de estudio, se encuentra dentro de la categoría C5. Se determinaron estas categorías a partir del análisis de las velocidades de corrosividad.

Algunos estudios que miden el contenido de cloruros en Cartagena, cerca de la zona turística estiman una velocidad de deposición de  $131,8 \text{ mg/m}^2 \text{ día}$ , en una estación colocada a 150 m aproximadamente del mar en el Instituto Tecnológico Mayor de Bolívar, en Cartagena. Además de arrojar como resultado los iones de cloruro como los principales agentes acelerantes de la corrosión, también muestra que la corrosividad atmosférica se encuentra en niveles alto y muy alto (Cano, Rios, Agamez, De la Hoz, & Agamez, 2016).

Cano, Noel, & Castañeda (2016) hacen una estimación de los iones cloruros que se encuentran en la Empresa Brinsa en la ciudad de Cartagena, y muestran una presencia considerable de iones de cloruros. Aquí se concluye que la zona más afectada por la corrosión es la zona más contaminada, esto se debe a que la corrosión atmosférica es



acelerada por los agentes contaminantes del ambiente, tales como los cloruros presentes en zonas costeras o los sulfatos presentes en zonas industriales.

Castaño y col. (2009) revela que Barranquilla posee la mayor velocidad de deposición de cloruros en comparación a San Bernardino, Chinú, Bogotá, Medellín y Cartagena. San Bernardino posee una velocidad de deposición de cloruros de  $0,21 \text{ mg/m}^2$  día, estos valores corresponden a la ciudad con menos concentración de cloruros dentro de las ciudades estudiadas. Luego le sigue Bogotá con  $1,42 \text{ mg/m}^2$  día. Por otro lado, encontramos a Medellín con  $2,12 \text{ mg/m}^2$  día, Chinú posee  $2,66 \text{ mg/m}^2$  día, Cartagena con  $5,69 \text{ mg/m}^2$  día y la ciudad con más contenido de cloruros es Barranquilla con  $96,59 \text{ mg/m}^2$  día. Estos resultados permitieron categorizar la corrosividad de estas ciudades según la norma ISO 9223 y Barranquilla se encuentra en la categoría C5, Bogotá en la categoría C4, Cartagena y Medellín se encuentran en los parámetros de C3 y las demás ciudades responden a los rangos de la categoría C2.

Los métodos más utilizados en las investigaciones para el contenido de cloruros en el ambiente y los regulados por la norma ISO 9225 del año 2012 son la candela húmeda y el método de la placa seca. En Colombia, el método más popular entre los autores es el de la candela húmeda, aunque ambos métodos necesitan un análisis químico, el método de la placa seca necesita una estructura un poco más grande, y debido a la familiarización que tenemos con el método de la candela húmeda basado en la revisión de trabajos anteriores, hemos optado por este método en nuestra investigación.

## 6. Parte Experimental

### 6.1. Delimitación de las zonas de estudio

El estudio se realizó en la Universidad de la Costa ubicada en la Calle 58 # 66 de la ciudad de Barranquilla, situada a 7,5 km del mar Caribe, a orilla occidental del río Magdalena (ver Figura 7), con latitud  $10^{\circ} 59' 16''$  al norte de la línea ecuatorial y longitud de  $74^{\circ} 47' 20''$  al occidente de Greenwich. Las zonas de estudios dentro de las instalaciones de la Universidad se muestran en la Figura 8.

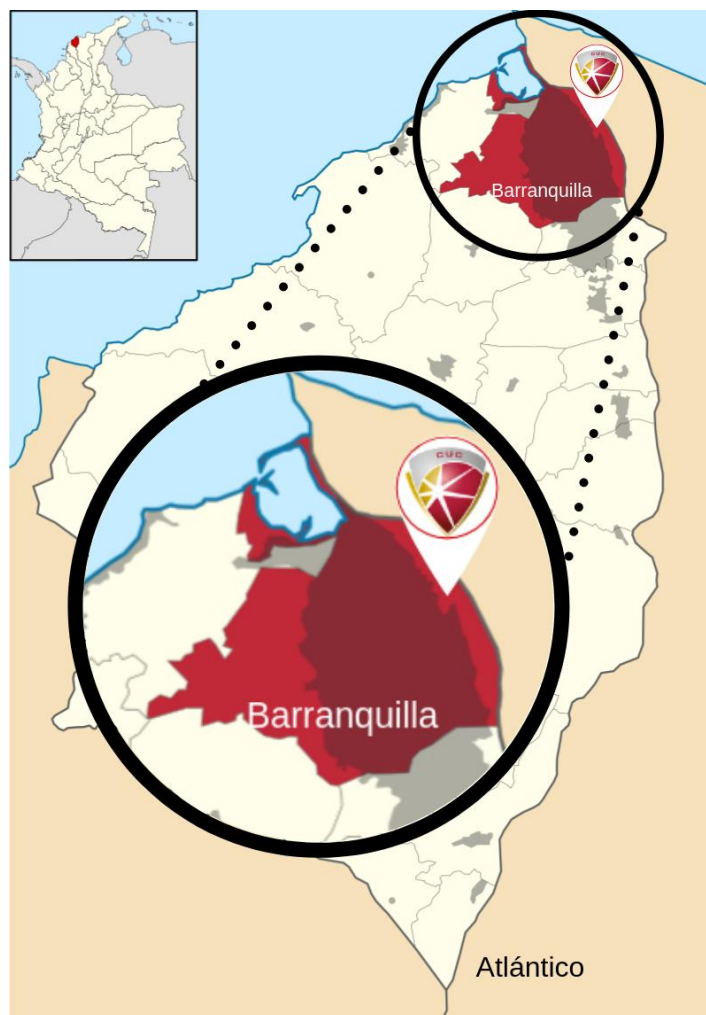


Figura 7. Mapa de localización de la Universidad de la Costa en Barranquilla, (Fuente: Elaboración propia

Fuentes Issa, Romero Natalia)

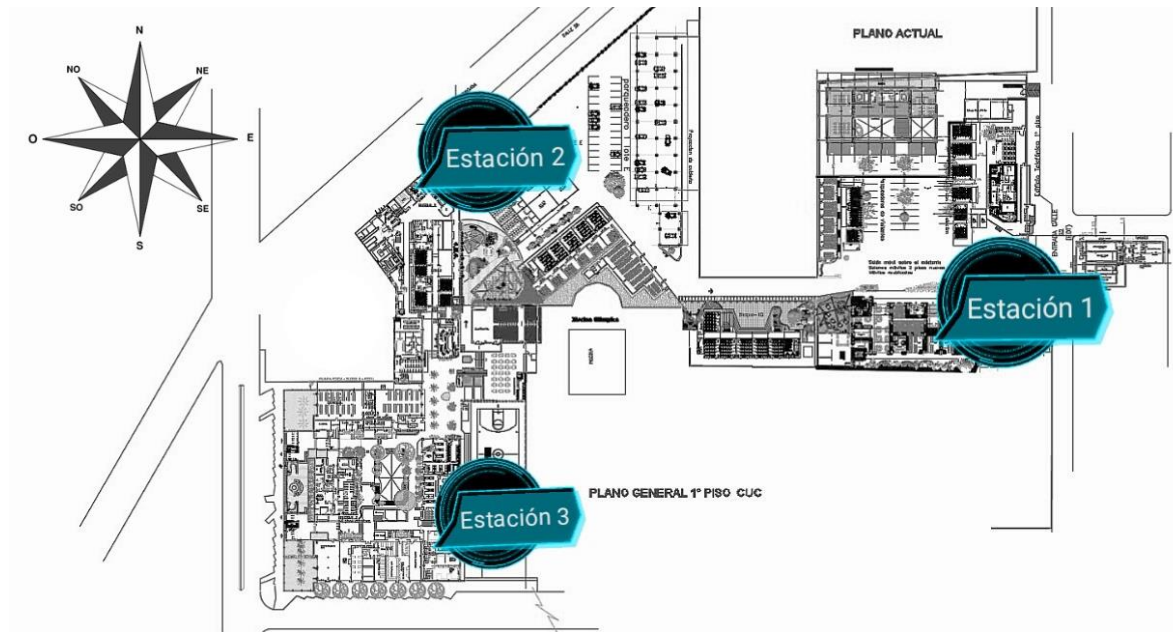


Figura 8. Sitios de exposición de las estaciones en la Universidad de la Costa. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

La estación 1 (E1) corresponde al objeto de estudio ubicado en el bloque 11 de la Universidad de la Costa (ver Figura 9), la estación 2 (E2) se encuentra ubicada en el bloque 9 (ver Figura 10), y la estación 3 (E3) se encuentra ubicada en el bloque A de la Corporación Universitaria Latinoamericana (CUL) (ver Figura 11).



Figura 9. Estación 1, Bloque 11. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

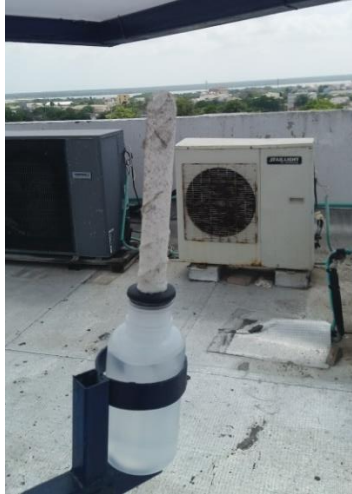


Figura 10. Estación 2, bloque 9. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)



Figura 11. Estación 3, bloque CUL. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

## 6.2. Información meteorológica

Los datos meteorológicos obtenidos durante los seis meses del estudio, fueron proporcionados por la estación meteorológica que se encuentra dentro de las instalaciones de la Universidad de la Costa, ubicada en la azotea del bloque 9, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Estación meteorológica de la Universidad de la Costa localizada en la azotea del bloque 9. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

### **6.3. Determinación de cloruros**

#### **6.3.1. Candela húmeda**

El método utilizado para la determinación de cloruros fue la candela húmeda y esta detallado en la norma ISO 9225. Este método consiste en exponer por un mes una gasa de dimensiones de 5x98 cm, humectada y enrollada en un tubo de vidrio de 2,7 cm de diámetro y 14,9 cm de largo. Previamente se hierve la gasa en agua destilada para eliminar cualquier contaminante. Simultáneamente a esto, se miden 400 mL de agua destilada, 100 mL de glicerina al 98% y 20 gotas de ácido octanoico para prevenir crecimiento de hongos y bacterias. Se mezclan todos estos productos en una botella de polietileno de 500 mL a la cual se le reemplaza la tapa por un tapón de caucho con un orificio en el centro, donde se introduce el tubo de vidrio con la gasa enrollada. El montaje se coloca en una estructura metálica con un techo que lo protege de la lluvia (Ver figura 13) (ISO 9225, 2012).



*Figura 13. Candela húmeda expuesta para la determinación de la velocidad de deposición de cloruros. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)*

Durante seis meses se expuso el sistema a la atmósfera y mensualmente se hicieron retiradas por cada estación, calculando posteriormente la velocidad de depósito de iones cloruro de cada una en  $\text{mg Cl}^-/\text{m}^2 \text{ d.}$

### **6.3.2. Determinación de $\text{Cl}^-$**

Después de retirar los envases de plástico de las tres estaciones, se transfirió el contenido de los mismos a un balón volumétrico de 500 mL, filtrándolo previamente (Ver figura 14).





Figura 14. Proceso de filtración de las muestras antes de medir el pH. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

Una vez filtradas las muestras, se determinó el pH de cada una con un medidor EcoSense pH100A (Ver figura 15).



Figura 15. Medición de pH. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

El pH de cada una de las muestras se ajustó a un pH entre 7 y 10, mediante la adición de gotas de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) preparada de la siguiente manera: se pesaron 4 g de NaOH y se adicionaron a un balón de 100 mL completando hasta el aforo con agua destilada. A medida que se adicionaban gotas a cada muestra, se realizó la medición del pH hasta que llegara al rango deseado.

### **6.3.3. Proceso para titulación**

#### **6.3.3.1. Equipos**

- a) Erlenmeyer de 250 mL
- b) Bureta de 50 mL

#### **6.3.3.2. Reactivos empleados**

- a) Estándar de nitrato de plata: para preparar esta disolución se tomaron 2,935 g de  $\text{AgNO}_3$  y se diluyeron con agua destilada hasta un volumen de 1000 mL. Finalmente, la disolución se depositó en una botella oscura.
- b) Indicador de cromato de potasio: para preparar esta disolución se disolvió 50 g de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  en aproximadamente 100 mL, y se le adicionó la solución de nitrato de plata, previamente preparada, hasta que se formó un precipitado de color rojo. Se dejó reposar 12 horas, luego se filtró y se diluyó con agua destilada hasta un volumen de 1000 mL.
- c) Estándar de cloruro de sodio: se diluyó 0,824g de NaCl en agua destilada hasta un volumen de 1000 mL.

#### **6.3.3.3. Determinación de $\text{Cl}^-$**

- a) Preparación de la muestra: se usó 10 mL de cada muestra, diluidos en agua destilada hasta un volumen de 50 mL.



- b) Titulación: a la muestra preparada (50 mL) se le adicionó 1 mL del indicador de cromato de potasio y se tituló con nitrato de plata, que se adicionó gota a gota, hasta que la solución cambió de un color amarillo a rosáceo. Para cada muestra estudiada se realizó el proceso de titulación 3 veces.

#### 6.4. Cálculos

Para la determinación de cloruros por el método argentométrico se considera el gasto de disolución de nitrato de plata “A” y se calcula la cantidad de cloruros presentes en la muestra mediante la siguiente operación:

$$mg/L = \frac{(A-B) \times N \times 35450}{V} \quad (1)$$

Dónde:

A = mL de nitrato de plata 0,1N gastados en la muestra

B = mL de nitrato de plata 0,1N gastados en el ensayo en blanco, con agua destilada

N = normalidad del nitrato de plata

V = Volumen de la muestra problema

Así mismo, se determina la cantidad real de mg/L de la muestra original:

$$V_1 C_1 = V_2 C_2 \quad (2)$$

Dónde:

V<sub>1</sub>= volumen de la muestra original

V<sub>2</sub>= volumen de la muestra diluida en agua destilada

C<sub>1</sub>= real mg/L muestra original

C<sub>2</sub>= mg/L muestra preparada

$$C_1 = \frac{V_2 C_2}{V_1} \quad (3)$$

Finalmente se calcula la velocidad de depósito de cloruros en mg/m<sup>2</sup> día:

$$V_{dep} = \frac{C_1 \times V_2 \times 10000}{\text{días} \times \text{area vela humeda}} \quad (4)$$

Además, se hace la estimación del índice de deterioro (I), planteado por Brooks y se calcula a partir de datos metereológicos de la siguiente forma (Brooks, 1950).

$$I = \frac{(HR-65) P}{100} \quad (5)$$

Donde, HR es la humedad relativa promedio en %, y P, la presión de saturación del vapor de agua en la atmósfera, expresado en mbar. La tabla 4 muestra los índices de deterioro establecidos según Brooks.

**Tabla 4.**

*Índice de deterioro según Brooks*

<b>I</b>	<b>Grado de deterioro</b>
<b>I &lt; 1</b>	Muy bajo
<b>1 &lt; I &lt; 2</b>	Bajo
<b>2 &lt; I &lt; 5</b>	Moderado
<b>I &gt; 5</b>	Alto

*Nota: Tomado de Brooks, C.E.P., Climate in everyday life, Dent, Londres, 1950*

## 7. Resultados y discusión

### 7.1. Influencia de las variables meteorológicas en la corrosión

Tal como se ha discutido en el marco referencial son diversos los factores que tienen incidencia en la corrosión atmosférica, entre ellos, las variables meteorológicas, como la temperatura, vientos y lluvia, los cuales se discutirán a continuación.

#### a. Temperatura

En la Figura 16 se muestran los valores de temperatura en grados centígrados (°C) presentados durante los meses de estudio. Se observa que esta variable se mantuvo constante durante dicho periodo, con valores promedio entre 28 y 29 °C, con un valor mínimo en el mes de julio de 28,5°C, y un valor máximo de 29,3°C en septiembre. Estos cambios son producto de la influencia de las lluvias y vientos. Los vientos arrastran nubes y mueven masas de aire en la atmósfera. Si observamos el comportamiento de las lluvias en la zona de estudio (ver Figura 20), se muestra que en el mes de septiembre la lluvia alcanzó el valor mínimo durante los meses de estudio, lo que posiblemente explica el aumento de la temperatura en ese mes.

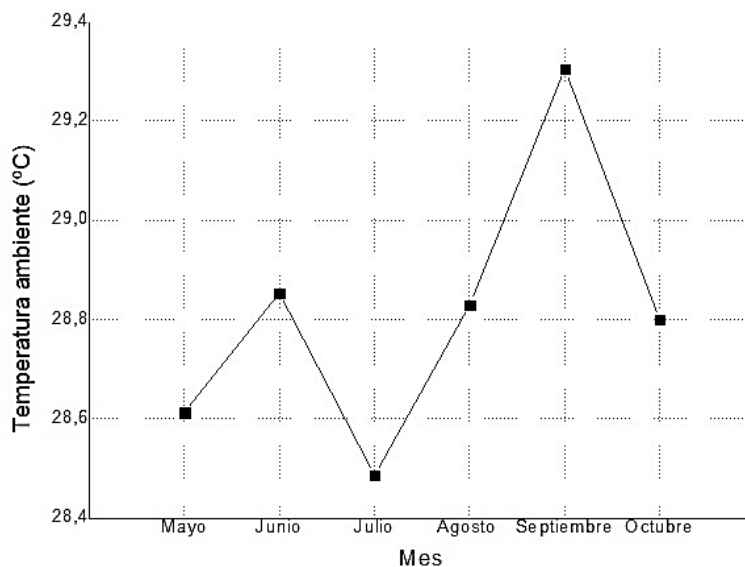


Figura 16. Gráfica de la temperatura ambiente durante los meses de exposición. (Fuente: Elaboración propia

Fuentes Issa, Romero Natalia)

La temperatura también tiene efecto sobre la humedad relativa, debido a que la cantidad de vapor de agua que puede contener una masa de aire, depende de dicho factor. A medida que va aumentando la temperatura del aire, este es capaz de contener más vapor de agua.

### b. Humedad Relativa

En la Figura 17 se muestra el comportamiento de la Humedad Relativa (HR) en la zona de estudio y se observa que la HR se mantuvo entre 83 y 85 % durante los meses de estudio, con un pico alto en el mes de mayo. Si comparamos los datos de temperatura mostrados en la Figura 16 con los de humedad relativa mostrados en la Figura 17, se evidencia que para el mes de septiembre, mes en que la HR aumentó, la temperatura aumentó; y en mayo, mes en el que se registra el valor más alto de HR, la temperatura disminuyó; este último hecho posiblemente se explica porque al disminuir la temperatura del aire, disminuye su capacidad para contener vapor de agua (disminuye el punto que representa la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede contener). Según LeBozec, Jonsson & Thierry (2004) valores de HR por encima de 78% y temperaturas mayores a 25°C son variables atmosféricas que aceleran la corrosión. De acuerdo con esto se puede establecer que las instalaciones de la Universidad de la Costa están expuestas a condiciones atmosféricas que aceleran el proceso de corrosión de los materiales metálicos.

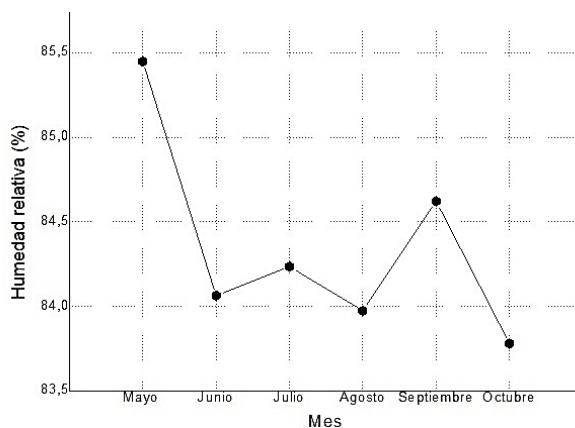


Figura 17. Gráfica de la humedad relativa durante los meses de exposición. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

### c. Tiempo de humectación

El Tiempo de Humectación (TDH) se define como las horas/años en la que la humedad relativa es igual o superior al 80% y a una temperatura mayor a 0 °C (Morcillo Linares & Chico González, 2018, pág. 37). De acuerdo a estos parámetros, la Figura 18 muestra el TDH para cada mes del año 2018, exceptuando diciembre debido a mantenimientos de los equipos. Es necesario considerar que los meses de estudio para esta investigación son de mayo a octubre, y para estos meses los datos oscilan entre 350 a 550 h/mes.

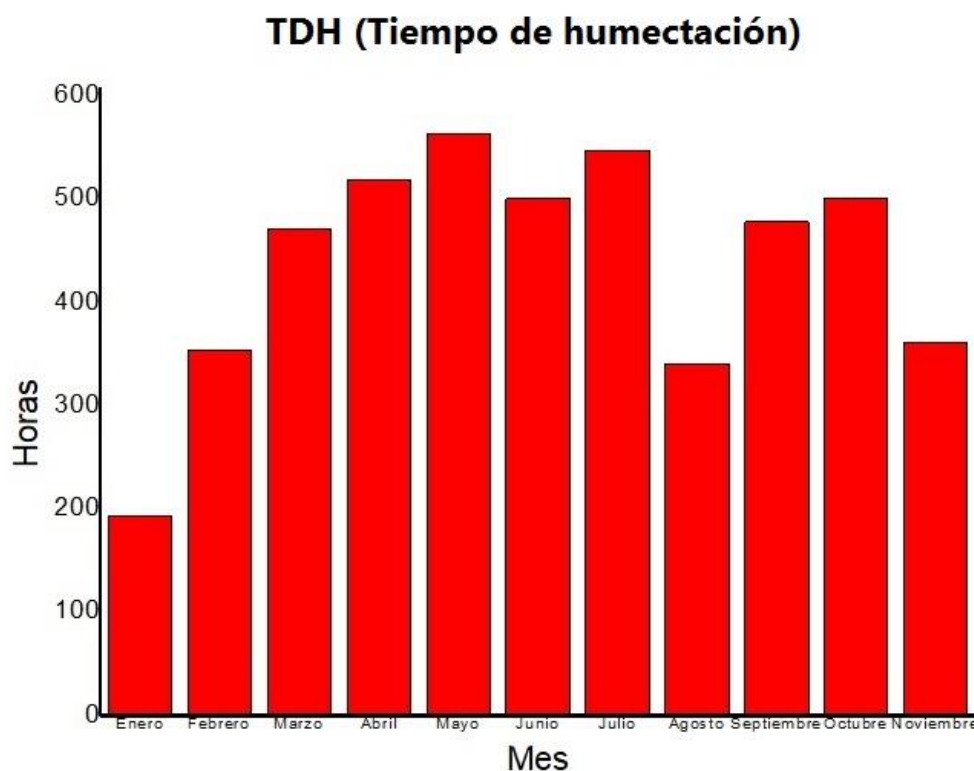


Figura 18. Distribución mensual del tiempo de humectación. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

El valor anual calculado de acuerdo a los datos obtenidos es de 5260 horas/año, y según la norma ISO 9223 (2012) (ver tabla 2), dicho valor se asigna a una atmosfera  $\tau_4$ , es decir, una atmósfera con una agresividad muy alta. El TDH está considerado como el tiempo real para que

los procesos de corrosión de metales, desarrollen la capa húmeda formada en la superficie metálica. Por lo tanto, entre más alto sea el TDH, más ocurre el fenómeno de la corrosión.

#### **d. Velocidad de los vientos**

La Figura 19, muestra la velocidad de los vientos durante los meses de exposición. Se detalla que el mes de julio es donde se presenta una mayor velocidad del viento, y en la figura 21, se muestra que, para este mismo mes, el promedio de concentración de cloruro de las tres estaciones es la más altas de todos los meses. Según Alcántara y col. (2015) existe una relación directamente proporcional entre la velocidad de los vientos, la altura de las olas del mar y la deposición de cloruros en el ambiente, es decir entre más alta sea la velocidad del viento, más altas son las olas del mar y las concentraciones de cloruro.

Por otro lado, en la Tabla 5, se muestra la distribución de la dirección de los vientos (en porcentaje), y se observa que la dirección que prevalece para la zona de estudio es ENE. En dicha dirección se encuentra situada la vía 40, zona industrial de Barranquilla, lo cual indicaría que los contaminantes generados por las industrias y el parque automotor ubicadas en dicha zona tienden a trasladarse hacia la zona de estudio con lo cual aumentaría las posibilidades de que las velocidades de corrosión de los materiales metálicos sea mayor, tal como lo establece Cano, Noel, & Castañeda (2016).

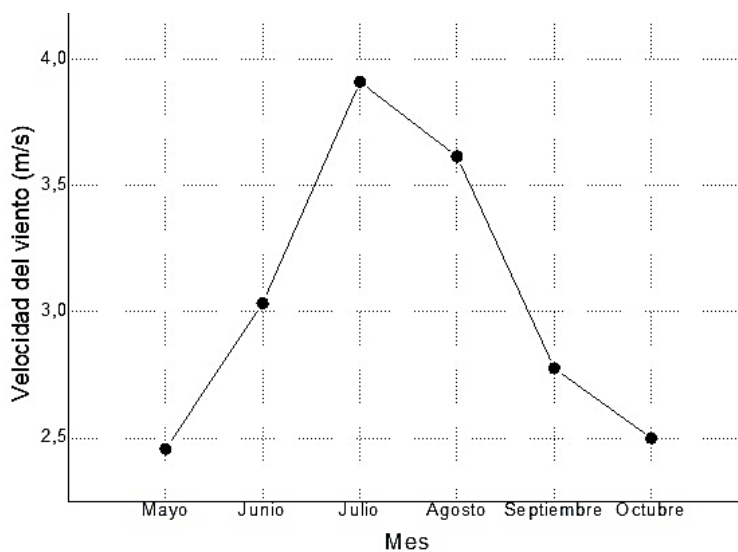
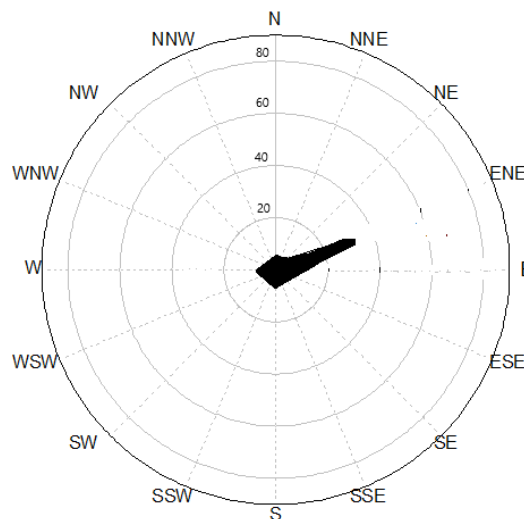


Figura 19. Gráfica de la velocidad del viento durante los meses de exposición. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

**Tabla 5.**

*Distribución de la dirección del viento en porcentaje en los 6 meses de exposición.*

Dirección	Porcentaje	Dirección	Porcentaje
<b>ENE</b>	31,75%	<b>OSO</b>	0,95%
<b>E</b>	27,57%	<b>SO</b>	2,09%
<b>ESE</b>	3,67%	<b>SSO</b>	1,84%
<b>SSE</b>	3,24%	<b>S</b>	3,69%
<b>SE</b>	4,52%	<b>NO</b>	0,68%
<b>NE</b>	13,33%	<b>ONO</b>	0,54%
<b>NNE</b>	3,00%	<b>O</b>	0,82%
<b>NNO</b>	1,24%	<b>N</b>	1,06%



*Nota: Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia*

### e. Lluvias

Así mismo, las precipitaciones acuosas, tales como la lluvia, aceleran la corrosión en la atmósfera como lo dice Chico, De la Fuente, Simancas y Morcillo (2005), ya que este fenómeno crea una película de electrolito por la cual la corrosión atmosférica transcurre en los metales. Sin embargo, cuando se mide salinidad en el ambiente, la lluvia limpia los contaminantes tales como los iones de cloruro en la atmósfera, es por eso que en la Figura 20 y 21 y en la Tabla 7 se puede observar que los meses donde la lluvia es casi nula como junio y septiembre, la salinidad iba aumentando.

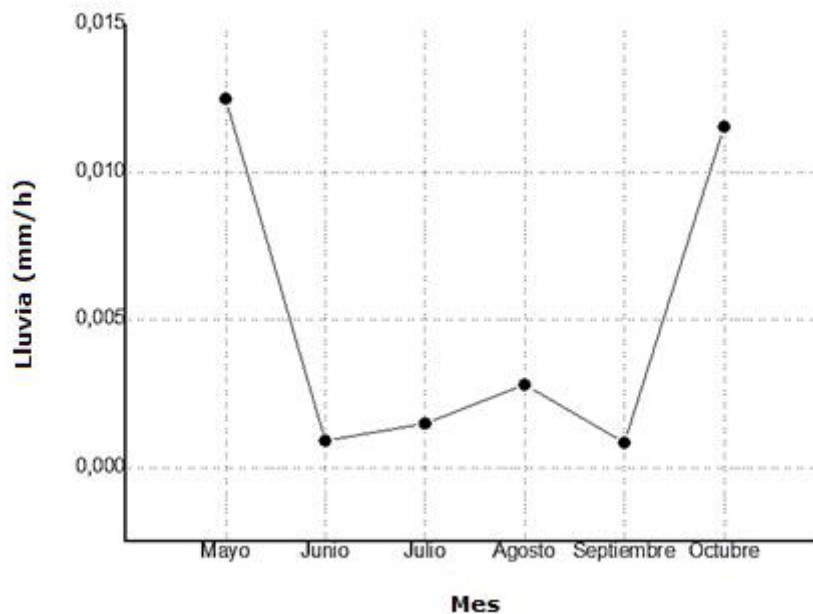


Figura 20. Gráfica de la lluvia en unidades de mm/h durante los meses de exposición. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

Considerando las variables meteorológicas de HR presentadas anteriormente y la presión de vapor de saturación del agua, se estimó el índice de deterioro (I), planteado por Brooks (ver ecuación 5); la relación calculada muestra un valor  $I = 7,7$ . Este valor permite aproximar la tasa de corrosión para materiales metálicos expuestos a atmósferas de tales condiciones y si



comparamos este dato con los calculados por Brooks y mostrados en la Tabla 4, se puede establecer que para la zona de la Universidad de la Costa el grado de deterioro es considerado alto.

## 7.2. Velocidad de deposición de cloruros en las zonas de estudio

Previo a la estimación de velocidad de cloruro en las estaciones de estudio, se realizó el cálculo de la concentración de cloruros en cada muestra, como se puede observar en la Tabla 6. Además, la Figura 21 muestra los resultados obtenidos de la velocidad de deposición de cloruros en las tres estaciones instaladas en la Universidad de la Costa. Se observa que la estación E1 presenta las velocidades de deposición más bajas, seguidas por la estación E2 y E3. Esta última presenta los valores promedio más altos de deposición de cloruros. La Tabla 7, muestra los datos obtenidos para cada estación durante los seis meses de estudio. De acuerdo a estos valores y comparando con los valores estipulados para la clasificación de la contaminación por la salinidad en el aire representada por cloruro descrita en la norma ISO 9223:2012 (ver Tabla 3), se puede establecer que las zonas estudiadas se encuentran clasificadas en la categoría S<sub>2</sub>, lo que representa que la Universidad de la Costa se encuentra ubicado en una zona de alta velocidad de deposición de cloruros sobre las estructuras.

**Tabla 6.**

*Concentraciones de cloruro por muestra (mg/L)*

	<b>Marzo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>
<b>E1</b>	11,66	16,32	21,32	11,99	13,99	13,66
<b>E2</b>	8,33	15,66	23,99	22,32	17,66	27,32
<b>E3</b>	30,99	30,99	23,99	20,32	17,32	19,66

*Nota: Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia*

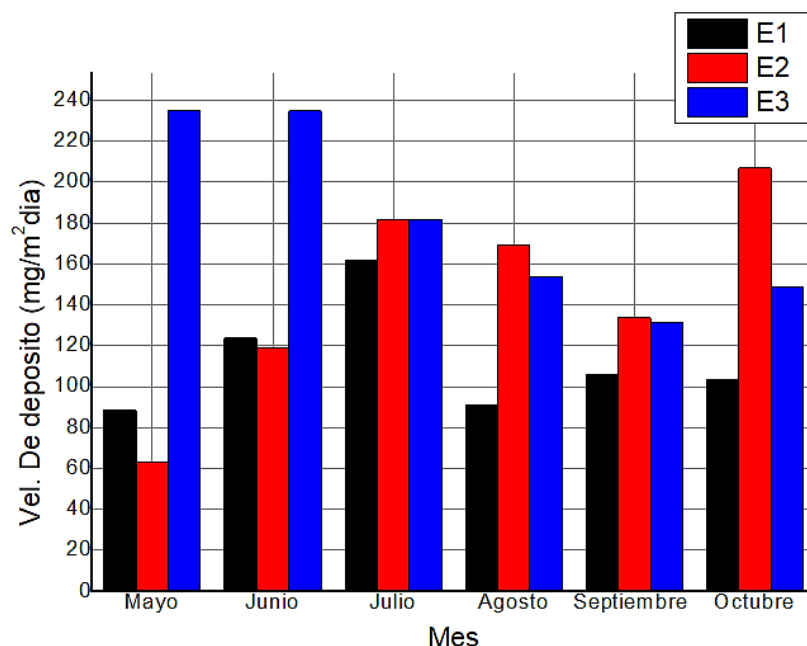


Figura 21. Diagrama de barras de la velocidad de deposición de cloruros en los meses de exposición para cada estación. (Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

**Tabla 7.**

Velocidad de deposición de cloruros en los meses de exposición para cada estación (mg/m<sup>2</sup>\*día)

	Marzo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Desviación estándar
<b>E1</b>	88,35	123,69	161,56	90,88	106,02	103,50	16,37
<b>E2</b>	63,11	118,65	181,76	169,13	133,79	207,00	22,61
<b>E3</b>	234,77	234,77	181,76	153,99	131,27	148,94	22,71

Nota: Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia

Como lo establece Cano (2013) la salinidad en un ambiente estudiado está influenciada como se ha dicho anteriormente por el régimen de vientos, distancia a la costa, topografía de la zona, altitud, etc. La figura 22 representa la variación de la salinidad con la distancia a la costa en las tres estaciones instaladas en la Universidad de la Costa. Se puede notar que si existe una relación hipérbolica entre la distancia al mar y el contenido de salinidad de las estaciones, esta

relación establece que las estaciones más cerca al mar contienen una mayor salinidad tal como lo establece Chico, y col. (1998).

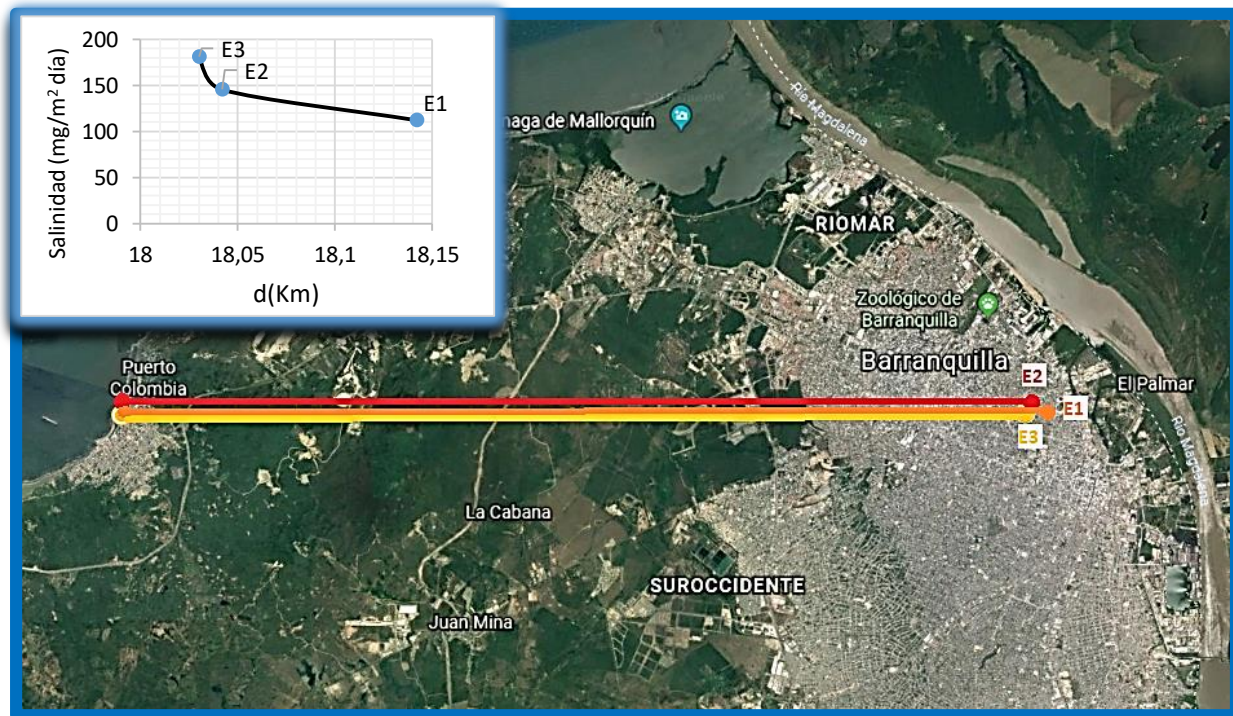


Figura 22. Variación de la salinidad con la distancia a la costa en las estaciones de estudio E1, E2 y E3.

(Fuente: Elaboración propia Fuentes Issa, Romero Natalia)

## 8. Conclusiones

En este trabajo se estimó la salinidad atmosférica de tres estaciones ubicadas en la Universidad de la Costa. La estación E3, que fue la más cercana al mar, presentó la mayor concentración de salinidad con un valor de 180,92 mg/m<sup>2</sup> día. En segundo y tercer lugar le siguen las estaciones E2 y E3, con una concentración de salinidad de 145,57 mg/m<sup>2</sup> día y 112,33 mg/m<sup>2</sup> día, respectivamente. Estos valores mostraron como resultado una relación hiperbólica entre distancia al mar y salinidad atmosférica.

Todos los valores del contenido de salinidad arrojados por cada mes, en cada una de las estaciones ubicadas en la Universidad de la Costa, categorizan a la zona según la norma ISO 9223 como una atmósfera S<sub>2</sub>.

En cuanto a las variables atmosféricas se presentó una temperatura ambiente promedio de 28,8°C, siendo julio el mes con la temperatura más baja con 28,4°C y septiembre la temperatura más alta con 29,4°C. En el caso de la HR el registro promedio entre los meses de marzo a septiembre fue de 84,35%, el máximo valor fue en mayo con 85,4% y el mínimo fue en octubre con 83,77%. En cuanto a la velocidad del viento, se presentaron velocidades con un promedio mensual de 3,04 m/s, el mes con mayor velocidad fue mayo con 2,45 m/s y el mes máximo fue en julio con 3,9 m/s. La dirección del viento en su mayoría dio coordenadas ENE con una frecuencia relativa porcentual del 31,75% durante los meses analizados. En cuanto a la lluvia, su promedio fue de 0,005 mm/h, con máximos valores en mayo y octubre con 0,013 mm/h y para los demás meses valores por debajo de 0,004 mm/h. El TDH mostró un resultado de 5260 h/a.

Por último, el grado de deterioro obtenido, según la ecuación de Brooks, mostró un resultado de 7,7 lo cual significa que los materiales metálicos expuestos en dicha zona tienden a tener un grado de deterioro alto, ubicando a las instalaciones de la Universidad de la Costa en una zona de alto riesgo por corrosión, y así mismo, están expuestas a condiciones atmosféricas que aceleran el proceso de corrosión de dichos materiales.

### **9. Recomendaciones**

Un material metálico podrá lograr una larga vida útil bajo condiciones de exposición en la atmósfera solamente si resiste la acción de este medio. Está claro que esta acción, aun siendo moderada, puede llegar a provocar con el paso del tiempo profundos daños en las estructuras diseñadas para más tiempo de utilidad.

Por tanto, es un requisito esencial la utilización de materiales estructurales que resistan a la acción corrosiva de la atmósfera, o, por lo menos, se hallen protegidos.

Algunos materiales metálicos muestran un alto grado de estabilidad en la atmósfera. Por ejemplo, el aluminio y el acero inoxidable, que desarrollan espontáneamente películas delgadas y protectoras de óxido, el cobre y los aceros patinables, que se cubren de capas compactas de productos de corrosión que frenan la corrosión. Entre los metales y aleaciones que, en principio, no necesitan protección especial y cuyo precio no es tan elevado que los haga inasequibles, cabe citar los:

- Aceros inoxidables
- Aceros patinables, de baja aleación y acero galvanizado
- Aluminios y sus aleaciones
- Zinc y sus aleaciones
- Cobre y sus aleaciones (Morcillo, Almeida, Fragata, & Panossian, 2002, pág. 64)

### **Recubrimientos de pintura**

La utilización de recubrimientos de pintura para evitar la corrosión metálica existe hace mucho tiempo y tiene numerosas aplicaciones industriales, como en grandes estructuras

metálicas expuestas a la atmósfera. Para garantizar la capacidad protectora del revestimiento de pintura se deben considerar los siguientes factores:

- a) Que el recubrimiento este bien formulado
- b) Que se realice un buen diseño de sistema de pintado
- c) Que la pintura sea correctamente aplicada

Para una correcta formulación del recubrimiento se debe conocer el propósito con que se usará el recubrimiento, si es con fines de combatir la corrosión o no; si la estructura que se protegerá está expuesta al ambiente atmosférico y de qué tipo es este ambiente (industrial, costero, marino, etc.).

Los factores que intervienen en un buen esquema de pintado se observan en la siguiente tabla:

**Tabla 8.**

*Componentes de un sistema de pintado.*

Esquema típico de pintado
1. Preparación de la superficie
2. Aplicación del recubrimiento
3. Sistema de pintura
a. Número de capas
b. Pintura de imprimación
c. Retoques
d. Pintura intermedia
e. Pintura de acabado
f. alternativas (si las hubiera)
4. Espesor total

*Nota: Tomado de (Feliu & Morcillo, 1982, pág. 178)*

**Importancia del diseño de la estructura**

Es importante tener en cuenta el diseño y forma de las estructuras, con el fin de permitir la facilidad del mantenimiento y proceso de limpieza constante, deben evitarse:

- a) Áreas de difícil acceso para su pintado
- b) Uniones bimetálicas o pares galvánicos
- c) Zonas de retención de agua, humedad, polvo, etc.
- d) Bordes agudos, salpicaduras de soldadura
- e) Soldaduras por puntos, uniones remachadas, uniones atornilladas.

La herrumbre, en las superficies pintadas, suele aparecer donde la lluvia, humedad condensada y partículas de polvo son retenidas. Para evitar estos puntos de corrosión, la superficie debe ser diseñada de modo que sea tan lisa como sea posible, sin esquinas y bordes agudos, cavidades, resquicios, protuberancias (ver Figura 23), etc. Las uniones entre miembros estructurales se aconseja realizarlas con soldadura continua. En caso de no poderse evitar la existencia de resquicios, estos deben ser cubiertos por recubrimientos especiales (Feliu & Morcillo, 1982, pág. 182).



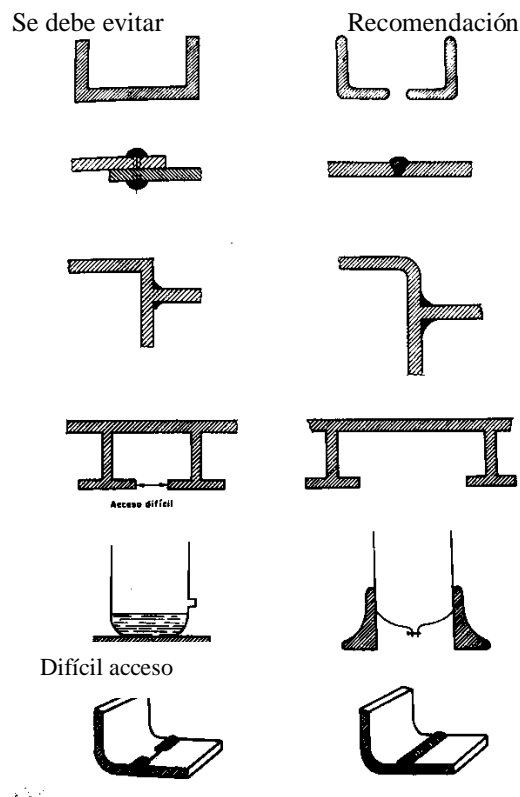


Figura 23. Detalles de diseño que deben ser evitados y práctica recomendada, Fuente: (Feliu & Morcillo, 1982, pág. 183)

### Duración de protección y frecuencia de mantenimiento

El tiempo estimado de vida en servicio, dependerá de la frecuencia del mantenimiento que se realice. El mantenimiento “ideal” es aquel que se efectúa cuando se detecta un deterioro (3 a 5%) del acabado, antes de que comience la corrosión.

El mantenimiento “práctico” es el que se realiza luego de que se detecta un 10% de deterioro del sistema de protección y se observa corrosión del sustrato. Para aspectos de economía, se recomienda realizar el mantenimiento ideal, puesto que una vez a comenzado la corrosión, es mucho más costoso el trabajo de reparación (Morcillo, Almeida, Fragata, & Panossian, 2002, pág. 584).

## 10. Referencias

- Alcántara, J., Chico, B., Díaz, I., De la Fuente, D., & Morcillo, M. (2015). Airborne chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosion of mild steel. *Corrosion science*, 74-88.
- Brooks, C. (1950). *Climate in everyday life*. Londres.
- Cano, H. (2013). *Aceros patinables (Cu, Cr, Ni): resistencia a la Corrosión atmosférica y soldabilidad*. Madrid, España.
- Cano, H., Noel, A., & Castañeda, A. (2016). Estimación de la Salinidad Atmosférica en la Empresa Brinsa S.A.
- Cano, H., Rios, J., Agamez, M., De la Hoz, L., & Agamez, L. (2016). Niveles de contaminantes de la ciudad de Cartagena de Indias y su impacto en la degradación de los monumentos arquitectónicos.
- Castaño, J., Botero, C., Restrepo, A., Agudelo, E., Correa, E., & Echeverría, F. (2010). Atmospheric corrosion of carbon steel in Colombia. *Corrosion Science*, 216–223.
- Castaño, J., Botero, C., Restrepo, A., Agudelo, E., Correa, E., & Echeverría, F. (2010). Atmospheric corrosion of carbon steel in Colombia . *Corrosion Science*, 216-223.
- Chaverra, D. (14 de Junio de 2016). *Inpra Latina*. Recuperado el 26 de Noviembre de 2018, de <https://www.inpralatina.com/201606146395/noticias/empresas/revelan-el-costo-global-de-la-corrosion.html>
- Chico, B., De la Fuente, D., Simancas, J., & Morcillo, M. (2005). Corrosión atmosférica de metales. Efecto de parámetros meteorológicos y de contaminación. *Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM/CSIC)*.

Chico, B., Otero, E., Mariaca, L., & Morcillo, M. (1998). La corrosión en atmósferas marinas.

Efecto de la distancia a la costa. *Revista de Metalurgia*, 50-57.

Cole, E., Ganther, W., Furman, S., Muster, T., & Neufeld, A. (2010). Pitting of zinc:

Observations on atmospheric corrosion in tropical countries. *Corrosion Science*, 848–858.

Corvo, F., Haces, C., Betancourt, N., Maldonado, L., Vèleva, L., Echeverría, M., y otros. (1997).

Atmospheric corrosivity in the caribbean area. *Corrosion Science*, 823-833.

Cuervo, j., Delgado, J., Herrera, F., & Arroyave, C. (1998). Indicadores de los Costos de la

Corrosión en Colombia . *Contaduría*.

Delgado, J., Castaño, J., Correa, E., Restrepo, A., & Echeverría, F. (2009). Clasificación de la

agresividad atmosférica en Colombia mediante métodos estadísticos multivariados. *Facultad de Ingenieria Universidad de Antioquia*, 41-50.

El-Sherik, A. (2017). *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission* . Woodhead Publishing.

Feliu, S., & Morcillo, M. (1982). *Corrosión y protección de metales en la atmósfera*. Barcelona: Ediciones Bellatera .

Gómez, F. (2004). *Manual Básico de corrosión para ingenieros*. Murcia, España: Universidad de Murcia.

Hamadi, L., Mansouri, S., Oulmi, K., & Kareche, d. (2018). The use of amino acids as corrosion inhibitors for metals: A review. *Egyptian Journal of Petroleum*, 1157-1165.

International Organization for Standardization (ISO 9223). (2012). *International Organization for Standardization*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2018, de

<https://www.iso.org/standard/53499.html>

- International Organization for Standardization (ISO 9225). (2012). *International Organization for Standardization*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2018, de <https://www.iso.org/standard/53501.html>
- LeBozec, N., Jönsson, M., & Thierry, D. (2004). Atmospheric Corrosion of Magnesium Alloys: Influence of Temperature, Relative Humidity, and Chloride Deposition. *Corrosion*, 356-361.
- LeBozec, N., Jonsson, M., & Thierry, D. (2004). Atmospheric Corrosion of Magnesium Alloys: Influence of Temperature, Relative Humidity, and Chloride Deposition. *Corrosion*, 356-361.
- Liboria Mariaca Rodríguez, J. G. (1999). *Corrosividad atmosférica*. Mexico, D.F.: Plaza Y Valdés S.A.
- Morcillo Linares, M., & Chico González, B. (2018). *La corrosión atmosférica del acero al carbono en ambientes costeros*. Madrid: Editorial CSIC.
- Morcillo, M. (1998). Predicción a corto y largo plazo de la corrosión atmosférica de metales. *Revista de Metalurgia*.
- Morcillo, M. C. (2018). *La corrosión atmosférica del acero al carbono en ambientes costeros*. Madrid: Editorial CSIC.
- Morcillo, M., Almeida, M., Fragata, F., & Panossian, Z. (2002). *Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica*. Madrid: Programa CYTED 2002.
- Moskvicheva, E., Sidyakinb, P., & Shitovb, D. (2016). Method of Corrosion Prevention in Steel Pressure Pipelines in Sewerage Systems. *Procedia Engineering*, 2381-2386.
- Navarrete Cueva, E. F. (2007). *Determinación de la corrosividad atmosférica de las ciudades de Santo Domingo y Esmeraldas*. Quito: QUITO/ EPN/ 2007.
- Perez, J. M. (10 de Junio de 2018). Desmontan por riesgo el puente de la Autónoma. *El Herald*.

Restrepo, A. H., Correa, E., Botero, C., Aristizabal, N., Quintero, O., Castaño, J. G., y otros.

(2007). Sistemas de información geográfica aplicados a estudios de corrosión atmosférica.

*Scientia et technica*, 537-542.

S. Rivero, B. C. (2007). Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente.

*Revista de metalurgia*, 370-383.

Sánchez, D. (2002). *Durabilidad y patología del concreto*. Asocreto.